

## Si, GaAsおよびInP太陽電池の 出力特性の温度依存性解析

山本昌勇\* 田中 徹\*\* 池尻忠夫\*

### Temperature Coefficient of Output Performance for Si, GaAs, and InP Solar Cells

Akio YAMAMOTO, Tohru TANAKA, and Tadao IKEJIRI

(Received Feb. 28, 1991)

Theoretical analysis has been made of temperature dependence of output characteristics for single-crystalline Si, GaAs and InP solar cells. The study is focused on the effects of cell structure, such as junction depth, on the temperature dependences and the comparison between theoretical and experimental results. It is shown that the temperature dependences markedly depend upon junction depth and type of cell. Minority carrier diffusion-length, surface recombination velocity and series resistance in the cell are also shown to significantly affect the temperature dependences. Good agreements are found between experimental and theoretical results.

#### 1. 序論

通常、太陽電池の出力は、太陽光照射などによる温度上昇によって低下する。従って、出力の温度係数の小さい太陽電池を実現することは、高効率化と同様、重要なことである。しかしながら、これまで、太陽電池出力の温度依存性については、2, 3の理論的、実験的研究 [1, 2] があるのみで、あまり注目されていたとは言えない状況である。それは、問題になるほどの温度上昇がない条件で使用されていたためであろう。最近、低コスト化と高効率化の両方が実現可能な太陽電池とし

て集光形太陽電池が注目されている。この太陽電池では、動作時に 100 °C 以上の高温になる可能性があるため、温度係数が小さいことは極めて重要になる。

従来の太陽電池出力の温度依存性についての研究では、主として、温度係数の電池材料依存性、特に、禁止帯幅依存性に着目した検討がなされており、構造的要因あるいは結晶品質的要因が温度係数に与える効果については検討されていない。その結果、同じ電池材料でも異なった温度依存性を有するという実験結果を説明できないという状況であった。

本研究の目的は、代表的な単結晶太陽電池について、太陽電池構造や接合深さなどの構造パラメータや少数キャリア拡散長などの結晶品質と出力の温度係数との関係を理論的に解明することである。特に、ここでは、Si, GaAs, および InP の太陽電池を取り上げた。周知のように、Si 太陽電池は、地上用、衛星用ともに広く使用されている。GaAs 太陽電池は、その高効率と耐放射線性に注目して、衛星用としての実用化が図られようとしている太陽電池である。InP 太陽電池については、最近、GaAs 太陽電池以上の優れた耐放射線性が見いだされ[3]、長寿命の衛星用太陽電池として期待されている。

構造や接合深さが異なるこれらの太陽電池について、少数キャリア寿命、移動度、吸収係数などの温度依存性を考慮した太陽電池出力の理論計算を行い、出力特性の温度依存性の支配要因について検討した。その結果、太陽電池出力の温度係数は、禁止帯幅などの材料パラメータのほか、素子構造や接合深さなどの構造パラメータ、ならびに、少数キャリア拡散長や表面再結合速度などの結晶品質に顕著に依存することが明らかになった。さらに、同一材料でも出力の温度依存性に幅があるという従来の実験結果も、構造パラメータや結晶品質依存性を考慮することで十分説明できることを確認した。これらの検討を通して、太陽電池設計においては、高効率化のみならず温度係数の小さい構造設計が必要であることを指摘した。

## 2. 解析方法および解析モデル

解析モデルとして、Si 太陽電池については  $n^+p$  構造、GaAs 太陽電池については  $n^+p$  構造および  $p^+p-n$  ヘテロフェイス構造、InP 太陽電池については  $n^+p$  および  $p^+i-n$  構造を取り上げた。これらの太陽電池うち、GaAs 太陽電池のエネルギーバンド図を Fig.1 に示す。

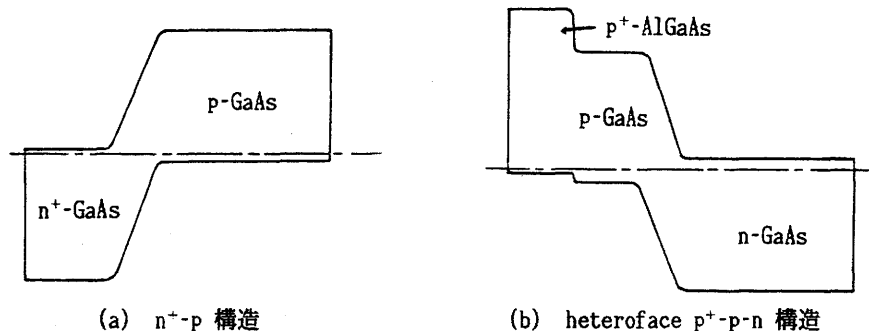


Fig. 1. Energy-band diagrams of GaAs solar cells with an  $n^+p$  and a heteroface  $p^+p-n$  structures.

解析は、まず、太陽電池構造の各層に対して、

$$D \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} + (1 - R) \alpha(\lambda) F(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] - \frac{\Delta n}{\tau} = 0 \quad (1)$$

で示される単色光についての少数キャリア連続の式を境界条件のもとで解き、過剰少数キャリア濃度  $\Delta n$  を求めた。ここで、 $x$  は表面からの深さ、 $R$  は反射率、 $\alpha(\lambda)$  は波長  $\lambda$  での吸収係数、 $F(\lambda)$  は波長  $\lambda$  での入射フォトン数、 $\tau$  は少数キャリア寿命である。これより各層での発生光電流  $J_{ph}(\lambda)$  を求めた。接合の空乏層については、強い内蔵電界のために少数キャリアの再結合は無視できることから、励起キャリアすべてが光電流になるとして求めた。

素子の全光電流  $J_{pht}$  は、次式に示すように各層での光電流の和  $\sum J_{ph}(\lambda)$  を Air Mass (AM) 0 の太陽光スペクトルについて積分することにより求まる。

$$J_{pht} = \int_0^{\lambda_0} \sum J_{ph}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ダイオードの逆方向飽和電流密度  $J_0$  は、拡散が支配的な場合については、キャリア発生項を含まない少数キャリア連続の式

$$D \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau} = 0 \quad (3)$$

より求めた。一方、生成・再結合過程が支配的な場合には、禁止帯中央付近に存在し、電子、正孔に対して等しい捕獲断面積を有する生成・再結合中心を仮定して、その濃度より求めた。

これらより、太陽電池の電流密度 ( $J$ ) - 電圧 ( $V$ ) 特性が次のように求まる。

$$J = J_{pht} - J_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + J R_s)}{n k T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

ここで、 $q$  は電子の電荷、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度、 $R_s$  は直列抵抗である。また、 $n$  はダイオードの理想因子で、拡散電流支配の場合は 1、生成・再結合電流支配の場合は 2 である。

温度依存性を有するパラメータとして、禁制帯幅  $E_g$  [4,5,6]、吸収係数  $\alpha$ 、移動度  $\mu$  [7,8]、少数キャリア拡散定数  $D$ 、少数キャリア寿命  $\tau$  [9,10]、真性キャリア密度  $n_i$ 、等価状態密度  $N_c$ 、 $N_v$  を考慮した。これらパラメータの温度依存性の結果としての短絡電流  $I_{sc}$ 、開放端電圧  $V_{oc}$ 、曲線因子  $FF$ 、最大出力  $P_m$  の温度依存性を調べた。なお、これらの計算では、実験結果との比較を行うため、光の反射損、太陽電池の直列抵抗および電極面積なども考慮した。

太陽電池の最大出力  $P_m$  は

$$P_m = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF$$

で表されることから、その温度依存性として次式が成り立つ。

$$\frac{1}{P_m} \frac{dP_m}{dT} = \frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} + \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \quad (5)$$

上式の各項を温度係数率とし、これらを用いて材料依存性や接合構造依存性を議論する。

### 3. 結果及び考察

#### (1) 太陽電池パラメータの温度依存性

Fig.2に、 $p^+-p-n$  ヘテロフェイス構造GaAs太陽電池の出力パラメータの温度依存性を示す。同図には、吉田による実験結果[11]を比較のために示す。最大出力  $P_m$  の実験結果と計算結果は比較的良く一致している。短絡電流  $I_{sc}$ 、開放端電圧  $V_{oc}$ 、曲線因子  $FF$  の温度係数はそれぞれ、正、負、負である。これらの総合としての  $P_m$  の温度係数は、約 170 K 以上では負である。

本検討では、300 K での温度係数について議論する。

#### (2) 温度係数の接合深さ依存性

$n^+-p$  構造を有する Si, GaAs, InP の各太陽電池について、出力パラメータの温度係数率の接合深さ依存性を、それぞれ、Fig.3, 4, 5 に示す。Si, GaAs 太陽電池については、顕著な接合深さ依存性はみられないが、InP 太陽電池は顕著な接合深さ依存性を示している。InP 太陽電池での、 $P_m$  の温度係数の顕著な接合深さ依存性は、 $I_{sc}$  の温度係数率が顕著な接合深さ依存性を持つためである。この  $I_{sc}$  の温度係数率の接合深さ依存性には 2 つの要因が考えられる。一つは禁制帯幅  $E_g$  の温度依存性、もう一つは  $n^+-p$  構造での  $n^+$  エミッタ層の正孔拡散長  $L_p$  の温度依存性である。Fig.6 に、 $L_p$

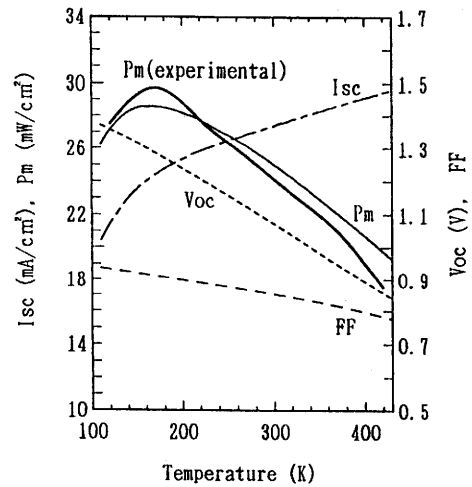


Fig. 2. Temperature dependence of solar cell parameters for a heteroface GaAs cell. The experimental result for  $P_m$  by Yoshida[11] is also shown.

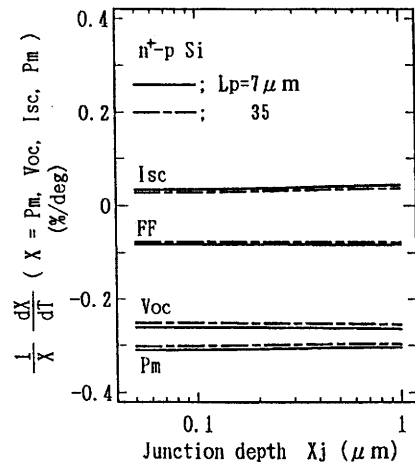


Fig. 3. Junction-depth dependence of relative temperature coefficients for  $n^+-p$  Si cells.

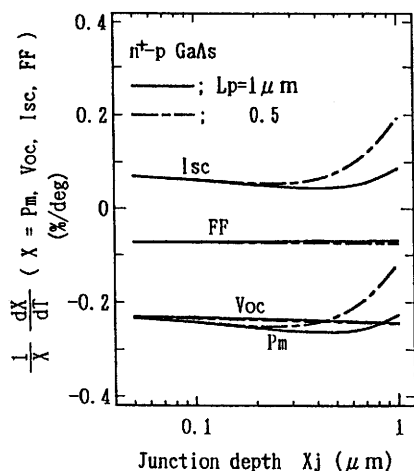


Fig. 4. Junction-depth dependence of relative temperature coefficients for  $n^+$ -p GaAs cells.

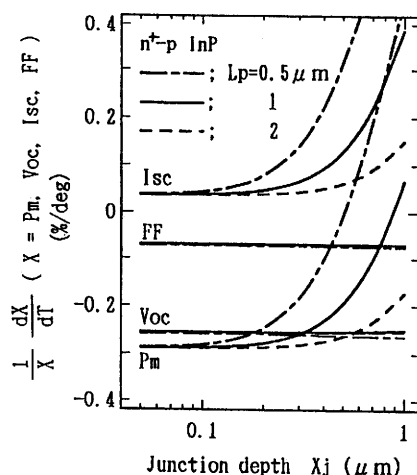


Fig. 5. Junction-depth dependence of relative temperature coefficients for  $n^+$ -p InP cells.

が温度依存性を持たないと仮定した場合の計算結果を示す。この結果から明かなように、 $I_{sc}$ の温度係数率は、 $L_p$ に温度依存性がない場合は、接合深さ依存性を示さないことから、原因は $L_p$ の温度依存性であることがわかる。

また、Fig.5から明かなように、 $I_{sc}$ の温度係数率の接合深さ依存性は、 $L_p$ が小さい程、小さな接合深さから顕著になる。これは、 $L_p$ が接合深さと同程度になると、温度変化による拡散長の変化が $I_{sc}$ に顕著な影響を及ぼすようになるためである。Si太陽電池では、 $L_p$ が接合深さに比べはるかに大きいために、 $I_{sc}$ の温度係数率は接合深さ依存性を示さない。

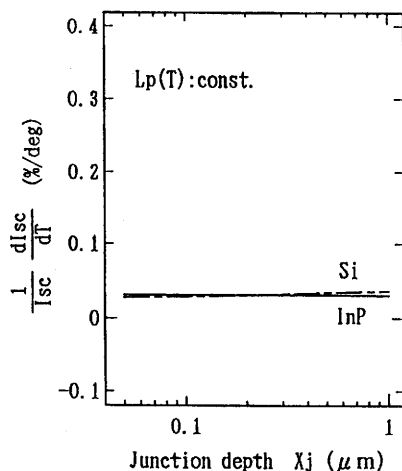


Fig. 6. Junction-depth dependence of  $(1/I_{sc})(dI_{sc}/dT)$  for a  $n^+$ -p Si cell and an InP cell when  $L_p(T)$  is independent of temperature.

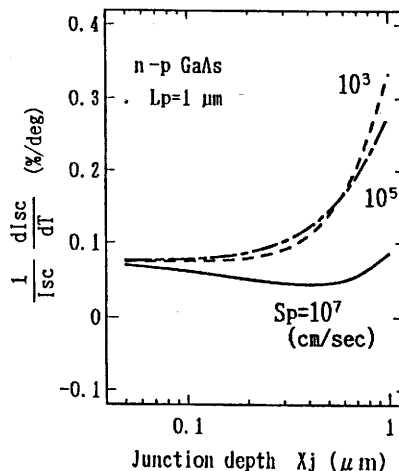


Fig. 7. Junction-depth dependence of  $(1/I_{sc})(dI_{sc}/dT)$  for  $n^+$ -p GaAs cells with a different surface recombination velocity  $S_p$ .

$n^+p$  構造の InP 太陽電池と GaAs 太陽電池における  $I_{sc}$  の温度係数率の接合深さ依存性の違いは、表面再結合速度  $S_p$  の違いによるものである。Fig. 7 は、それを説明するために、GaAs 太陽電池について、 $S_p$  を変化させた場合の結果である。この結果から明かなように、 $S_p$  が小さければ、GaAs 太陽電池の場合でも、顕著な接合深さ依存性が現われる。

以上の結果から、InP の最大出力  $P_m$  の温度係数率の顕著な接合深さ依存性は、InP の比較的比較的小さい  $L_p$  と  $S_p$  によるものであるといえる。

### (3) 温度係数の構造依存性

接合深さと同様、接合構造も温度係数率に影響を与える。Fig. 8 は GaAs 太陽電池における  $n^+p$  構造とヘテロフェイス  $p^+p-n$  構造の比較を示す。ヘテロフェイス構造太陽電池は、GaAs の表面再結合速度が大きいことによる効率低下を改善するために、GaAs に格子整合する AlGaAs を窓層として使用するものである。Fig. 8 の結果から、ヘテロフェイス構造の方が接合深さ依存性が小さいことがわかる。これは、ヘテロフェイス構造での  $p$  層の不純物濃度が比較的低く設計でき、その結果、ここでの電子拡散長  $L_n$  が接合深さに比べて大きくできるからである。両構造を比較すると、ヘテロフェイス構造の方が  $V_{oc}$  の温度係数率の絶対値が小さく、その結果、ヘテロフェイス構造の方が  $P_m$  の温度係数率の絶対値が小さい。ヘテロフェイス構造での  $V_{oc}$  の温度係数率の絶対値が小さい理由は、この構造での逆方向飽和電流密度が  $n^+p$  構造に比べて約 2 桁小さいためである。このように、 $n^+p$  構造に比べるとヘテロフェイス構造の方が優れた温度依存性を有することがわかる。

次に InP 太陽電池について、 $n^+p$  構造と  $p^+i-n$  構造の比較を行う。 $p^+i-n$  構造の出力計算では、逆方向飽和電流として  $i$  層内での生成・再結合電流を考慮し、ダイオードの理想因子  $n$  を 2 とした。一方、 $n^+p$  構造については拡散電流を仮定し、 $n = 1$  としている。Fig. 9 から明かなように、 $p^+i-n$  構造の  $V_{oc}$ 、FF の温度係数率の絶対値が、 $n^+p$  構造よりかなり大きい。その結果、

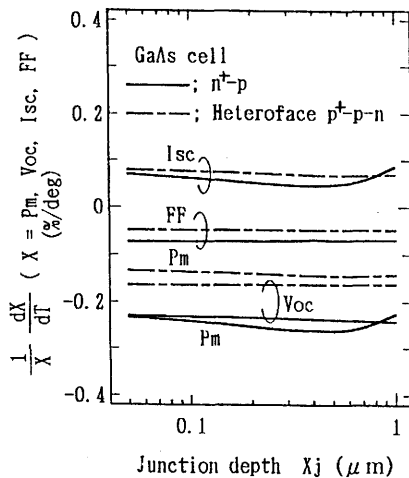


Fig. 8. Comparison of relative temperature coefficients between an  $n^+p$  and a heteroface GaAs solar cells.

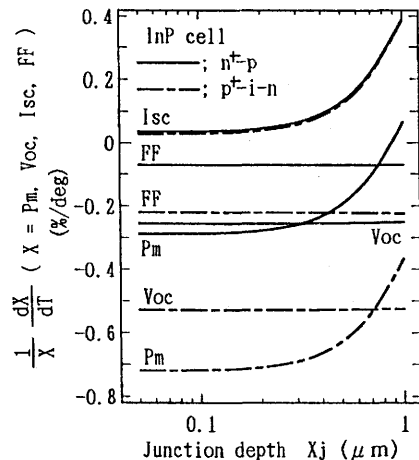


Fig. 9. Comparison of relative temperature coefficients between an  $n^+p$  and a  $p^+i-n$  InP solar cells.

$p^+-i-n$  構造の方が  $P_m$  の温度係数率の絶対値が大きくなっている。 $V_{oc}$  の温度係数率の絶対値が大きい原因は、 $p^+-i-n$  構造での飽和電流密度が大きいためである。また、 $p^+-i-n$  構造の  $FF$  の温度係数率の絶対値が大きい原因は、ダイオード因子  $n=2$  のため、 $FF$  が小さいことによる。このように、 $p^+-i-n$  構造の出力温度依存性は  $n^+-p$  構造に劣ることがわかる。この点については、実験結果との比較において、再度議論する。

#### (4) 計算値と実験値との比較

ここでは、 $InP$  太陽電池を例にとり、計算結果と実験結果との比較を行い、本解析の妥当性を明らかにする。

Fig.10に、 $n^+-p$  構造  $InP$  太陽電池の各出力パラメータの温度係数率の計算結果と実験結果を接合深さの関数として示す。ここでの実験結果は、イオウ(S)拡散により作製した素子[12] について、AM 0 (シュミレータ：スペクトロラボ社製 X-25)，20~60 °C の条件で測定したものである。実験結果は、計算結果と比較的よく一致しているが、 $I_{sc}$ 、 $P_m$  の温度係数率の接合深さ依存性は比較的小さい。その原因として考えられることは、接合深さの増大、すなわち、 $n^+$  層の厚さの増大とともに、この層の少数キャリア拡散長  $L_p$  が増大していることである。このように考えれば、計算結果と実験結果はかなりよい一致を示しているといえる。

Fig.10には、Weinbergらによる実験結果[2,13]を比較のために示す。彼らの結果と今回の測定結果も比較的よく一致している。Weinbergらの結果では、 $P_m$  の温度係数率にかなりの幅があり、その原因は  $FF$  の温度係数率に幅があるためと考えられる。Fig.10に示すように、 $FF$  の温度係数率は直列抵抗に大きく依存するとの計算結果が得られることから、直列抵抗のばらつきが  $FF$  の温度係数率のばらつき、ひいては  $P_m$  の温度係数率のばらつきの原因になっていると考えることができる。

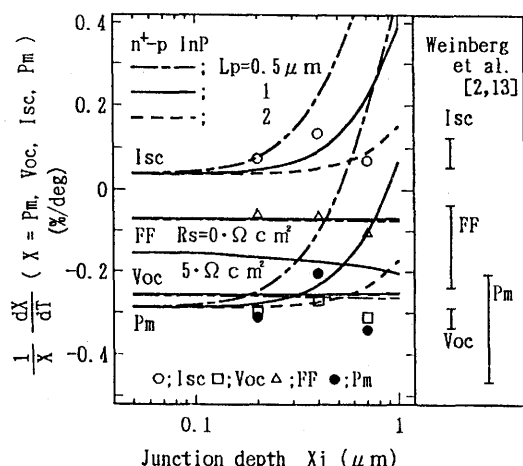


Fig. 10. Comparison between calculated and experimentally-obtained relative temperature coefficients for  $n^+-p$   $InP$  cells.

Table 1. Experimental  $(1/P_m)(dP_m/dT)$  for  $n^+-p$   $InP$  cells and  $p^+-i-n$   $InP$  cells with an  $i$ -layer thickness of 2  $\mu m$

Structure	Sample No.	$(1/P_m)(dP_m/dT)$ (deg <sup>-1</sup> )
$n^+-p$	16-5M	-0.00196
	64-4	-0.00325
$p^+-i-n$	5-28-1	-0.00450
	8-14-1	-0.00631

すでに述べたように、 $n^+-p$  構造の方が  $p^+-i-n$  構造よりも  $P_m$  の温度係数率の絶対値が小さいことが計算により予想された。そこで、InP 太陽電池について、両構造の実験結果を比較した。測定条件は  $n^+-p$  構造の結果の場合と同様である。Table 1 に、その結果を示す。 $p^+-i-n$  構造[14]は、 $n^+-p$  構造よりも、 $P_m$  の温度係数率の絶対値が大きいことが確認された。その原因は、 $FF, V_{oc}$  の温度係数率の絶対値が大きいためである。

#### 4. まとめ

太陽電池出力の温度依存性の支配要因を明らかにする目的で、Si, GaAs, InP 太陽電池についての出力特性の理論解析を行った。その結果、支配要因として、従来検討されてきた太陽電池材料の禁止帯幅の温度依存性以外に、接合深さ、接合構造などの構造的要因、さらには、少数キャリア拡散長などの結晶品質も極めて重要であることが明らかとなった。また、今回取り上げた三種類の太陽電池の特徴も明確にすることができた。計算結果と実験結果の間にはよい一致がみられ、従来の実験結果も、このような要因を考慮することで、十分説明できることがわかった。

以上の結果は、同一の材料でも構造設計によつて温度依存性の小さい太陽電池の実現が可能であることを意味しており、今後特に、高温動作が予想される集光太陽電池においては、このような観点からの検討が必要であるといえる。

#### 参考文献

- [1] J. C. C. Fan, Solor Cells, 17, 309 (1986).
- [2] I. Weinberg, C.K. Swartz and R.E. Jr, Solor Cells, 22, 113 (1987).
- [3] A. Yamamoto, M. Yamaguchi, and C. Uemura, Appl. Phys. Lett., 44, 611, 1984.
- [4] S.M. Sze 著, 南日康夫, 川辺光央, 長谷川文夫訳 「半導体デバイス」 産業図書, p.12 1987
- [5] 工業調査会編「化合物半導体デバイス」工業調査会, p.370, (1973).
- [6] 文献[5] p.409
- [7] 高橋 清 著 「半導体工学」 森北出版, p.345, (1985).
- [8] 文献[5] p.405
- [9] 浜川, 後川, 高橋 編著 「太陽光発電」 森北出版, p.42, (1980).
- [10] 文献[5] p.357
- [11] 吉田 進, 学位論文 (東京工業大学), (1983).
- [12] A. Yamamoto, M. Yamaguchi, and C. Uemura, IEEE Electron Devices, ED-32, 2780 (1985).
- [13] I. Weinberg, C.K. Swartz and R.E. Hart. Jr, Proc. 19th IEEE PVSC, 548 (1987).
- [14] Y. Itoh, M. Yamaguchi, and C. Uemura, IEEE Electron Devices Lett., EDL-7, 127 (1986).